

УДК 669.162

к.т.н. Диментьев А. О.,  
к.т.н. Должиков В. В.,  
Михайлюк Г. Д.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, [dimentev@inbox.ru](mailto:dimentev@inbox.ru)),

к.т.н. Карнов А. В.  
(ЛГТУ, г. Липецк, РФ)

## ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВКИ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ХОДА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО ОБЪЕМА

В работе приведены результаты статистического исследования связей основных показателей работы доменных печей разного объема (производительность печи и удельный расход топлива) с интенсивностью плавки. Определено, что зависимости между ними не имеют экстремального характера, отмеченного в ряде исследований, но при этом они достаточно надежно связаны линейно.

**Ключевые слова:** доменная печь, производительность печи, удельный расход топлива, интенсивность плавки, связи показателей доменной плавки.

Основным техническим показателем работы доменной печи является ее производительность, а экономическим — себестоимость чугуна, в составе которой затраты на топливо (кокс + добавки) обычно являются наибольшими.

Сравнение работы разных доменных печей, особенно в отношении их удельной производительности и расхода кокса, наталкивается на ряд трудностей. Они возникают вследствие того, что и производительность, и расход кокса определяются в той или иной степени всеми технологическими параметрами и шихтовыми условиями плавки.

Еще в прошлом веке в металлургии чугуна начали использовать понятие интенсивности плавки (или форсирования хода доменной печи). Под интенсивным ходом доменной печи понимали способ ведения плавки с максимально возможным количеством подаваемого в печь дутья. В этом случае, при неизменных шихтовых условиях, достигали наибольшей производительности [1].

Однако для различных по размерам печей максимально возможное количество дутья отличается, поэтому использовать этот параметр доменной плавки для сравнения работы разных по объему металлур-

гических агрегатов неправомерно. В связи с этим для выделения влияния интенсивности хода доменной печи на основные показатели плавки — суточную производительность ( $Pr$ ) и удельный расход кокса ( $K$ ) — определяют разные показатели интенсивности. Они чаще всего представляют собой показатели плавки, отнесенные к единице объема (или площади сечения) печи в единицу времени [1–3].

Пользуются:

а) коэффициентом использования полезного объема печи, представляющим полезный объем печи ( $V_{пол}$ ), приходящийся на тонну суточной выплавки чугуна:

$$КИПО = \frac{V_{пол}}{Pr};$$

б) количеством израсходованного кокса (интенсивностью горения) в час на  $1 \text{ м}^2$  сечения горна —  $J$ ;

в) количеством дутья в единицу времени на  $1 \text{ м}^2$  сечения горна или количеством газов на  $1 \text{ м}^2$  сечения распара, примерно пропорциональным интенсивности горения  $J$  (п. б);

г) объемной интенсивностью горения кокса или интенсивностью плавки по коксу (количеством кокса в сутки на  $1 \text{ м}^3$  полезного объема печи) —  $I_k$ .

$$I_k = \frac{K \cdot Pr}{V_{пол}}$$

При применении природного газа или других восстановителей объемная интенсивность определяется количеством суммарного углерода кокса и восстановителей, поступивших в сутки на  $1 \text{ м}^3$  полезного объема печи;

д) количеством дутья в минуту на  $1 \text{ м}^3$  полезного объема доменной печи —  $V_д/V_n$  и рядом других показателей интенсивности плавки.

Все эти показатели тесно связаны между собой. Чаще всех используется интенсивность плавки по коксу.

В работе [3] приведены зависимости различных удельных показателей производительности и интенсивности плавки по коксу от полезного объема доменных печей. Показатели рассчитаны по результатам компьютерного моделирования доменной плавки в печах разного объема при одинаковых условиях плавки. Оказалось, что с ростом полезного объема доменных печей показатели удельной производительности и интенсивности плавки по коксу уменьшаются.

Однако авторы исследования не приводят практических данных, подтверждающих результат исследования. В реальных условиях работы печей интенсивность плавки по коксу колеблется в довольно широких пределах.

Характерной особенностью современной доменной плавки является использование значительного количества (до 50 %), дополнительного к коксу, топлива: угольной пыли и природного газа. При этом большая доля фурменного газа, создающего сопротивление опусканию шихтовых материалов, образуется при сгорании вдуваемого топлива. В связи с этим более представительно выражать производительность ( $P$ ) доменной печи в виде произведения двух ее составляющих — балансовой ( $P_б$ ) и газодинамической ( $P_г$ ) [2]:

$$P = P_б \cdot P_г.$$

Балансовая составляющая производительности является функцией суммы расхода кокса, расхода вдуваемого топлива ( $BT$ ) и содержания кислорода ( $\omega$ ) в дутье:

$$P_б = f \cdot [(K + BT) \cdot \omega].$$

Авторы не указывают вид функции, а значит, и способ ее расчета. Физический смысл балансовой составляющей производительности — выплавка чугуна на  $1 \text{ м}^3$  газа, образующегося в печи. Следует отметить, что вид и химический состав  $BT$ , особенно при вдувании газообразного топлива, будут существенно влиять на количество образующегося газа, что никак не отражено в формуле.

Более полувека назад была установлена экстремальная зависимость  $Pr$  и  $K$  от интенсивности плавки по коксу ( $I_k$ ) [1], подтвержденная затем и другими исследователями. Причем экстремальные значения  $Pr$  и  $K$  достигаются при разных значениях  $I_k$ . Объясняется это особенностями изменений характеристик газового потока в доменной печи с изменением  $I_k$  [2, 4].

В представленной работе решались задачи выявления связей показателей интенсивности плавки с объемом печей и экстремальными значениями  $Pr$  и  $K$ .

Эффективным средством обобщения результатов работы доменных печей является использование методов математической статистики, которые не являются абсолютным средством при изучении взаимосвязей сложных процессов, по причине формализованного подхода, присущего всем математическим методам исследования [5–7].

Сочетание статистических расчетов с технологическим анализом дает возможность значительно обогатить наши представления о доменном процессе, а также прийти к серьезным практическим выводам и рекомендациям.

В исследовании использовали процедуры анализов распределений, регрессионного и корреляционного, а также отдельные элементы дисперсионного анализа [5].

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В качестве данных для статистического анализа использовали выборки суточных результатов работы шести доменных печей двух металлургических предприятий. Исходные данные были подвергнуты первичной обработке, в ходе которой удалены периоды с простоями и так называемым тихим ходом длительностью более 30 минут.

Для изучения структуры данных рассматривали гистограммы, таблицы частот, временные ряды показателей.

Анализ данных позволил выделить периоды для исследования, в которых:

а) не было выбросов — кратковременных периодов (1–2 суток) с существенным отличием по производительности;

б) отличался компонентный состав используемого топлива (К+ПГ (природный газ), К+ПГ+ПУТ (пылеугольное топливо)) длительностью более 10 сут.

При выделении периода по пункту б удалены временные интервалы перехода по компонентному составу используемого топлива.

Основные статистические характеристики исследуемых показателей приведены в таблице 1. Средние значения являются средними по указанной выборке.

Необходимо отметить, что минимальные и максимальные значения показателей в таблице не являются таковыми в строгом смысле.

Таблица 1

Основные статистические характеристики исследуемых показателей (%)

№	Полезный объем печи, м <sup>3</sup>	Длительность периода, сут.	Суточное производство, т/сут.		Расход кокса, кг/т чугуна		Расход топлива, кг/т чугуна	
			среднее	max	средний	min	средний	min
1	2000	196	5100	5370	420	399	500	480
2	2000	75	6150	6300	380	360	480	460
		824	5770	6650	307	230	488	415
3	3000	461	6010	6850	-	-	531	460
4	3200	812	7780	8660	310	273	498	460
5	3900	174	8490	8820	330	305	505	470
6	4300	608	12160	13040	404	373	504	470

Продолжение таблицы 1

№	Полезный объем печи, м <sup>3</sup>	$I_m^*$ , т/(м <sup>3</sup> ·сут.)			КИПО, м <sup>3</sup> ·сут./т чугуна	$V_d/V_n$	Состав топлива
		при min расходе $T$	средний	при max $P_p$			
1	2000	1,22	1,28	1,34	0,39	1,87	К + ПГ
2	2000	1,44	1,48	1,52	0,33	2,065	К + ПГ
		1,27	1,41	1,54	0,35	2,060	К+ПГ+ ПУТ
3	3000	0,78	1,03	1,25	0,50	1,90	К + ПГ
4	3200	1,09	1,21	1,33	0,41	1,80	К+ПГ+ ПУТ
5	3900	1,01	1,10	1,13	0,46	1,50	К+ПГ+ ПУТ
6	4300	1,46	1,59	1,68	0,35	1,72	К + ПГ

\*С нашей точки зрения, употребление названия интенсивность плавки по коксу и обозначения  $I_k$  не соответствует реальному содержанию понятия при плавке с использованием дополнительных вдуваемых топлив. Поскольку в расчете показателя общий расход топлив суммируется (с использованием различных весовых коэффициентов), логичнее назвать рассматриваемый показатель интенсивностью плавки по топливу с обозначением —  $I_m$ .

Они рассчитывались для каждого показателя следующим образом. По таблице частот определяли границу минимального (максимального) значения показателя и прилегающий интервал, включающий 30–40 значений больше (меньше) минимального (максимального). Из полученной выборки, чтобы исключить влияние случайных отклонений, выделяли последовательные по времени интервалы длиной не менее 3-х суток. По отобранным интервалам рассчитывали средние значения, а затем, из совокупности полученных средних, выбирали наименьшее (наибольшее).

Полученные результаты не позволяют утверждать, что интенсивность плавки по топливу зависит от объема доменных печей (рис. 1).

Можно отметить тенденцию уменьшения интенсивности плавки по топливу с увеличением объема печей, если исключить из рассмотрения данные по доменной печи 6 объемом 4300 м<sup>3</sup>. Для уточнения наличия вышеуказанной связи, очевидно, требуются дополнительные исследования.

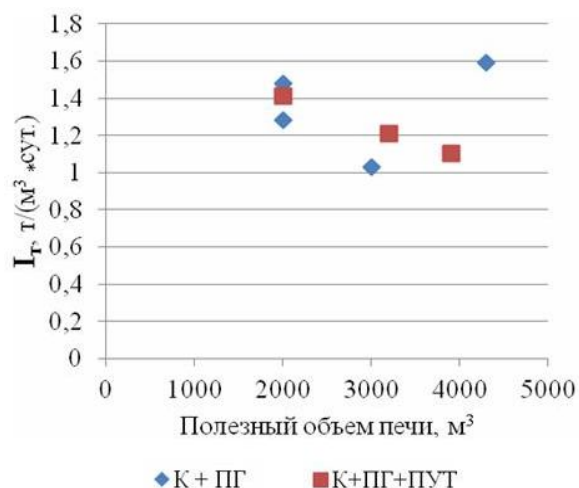


Рисунок 1 Связь показателя интенсивности плавки  $I_m$  с полезным объемом доменных печей и составом вдуваемого топлива

На рисунке 2 показаны значения различных показателей интенсивности плавки. Данные, показанные на гистограмме, также указывают на отсутствие связи различных показателей интенсивности плавки с объемом доменных печей и компонентным составом вдуваемого топлива.

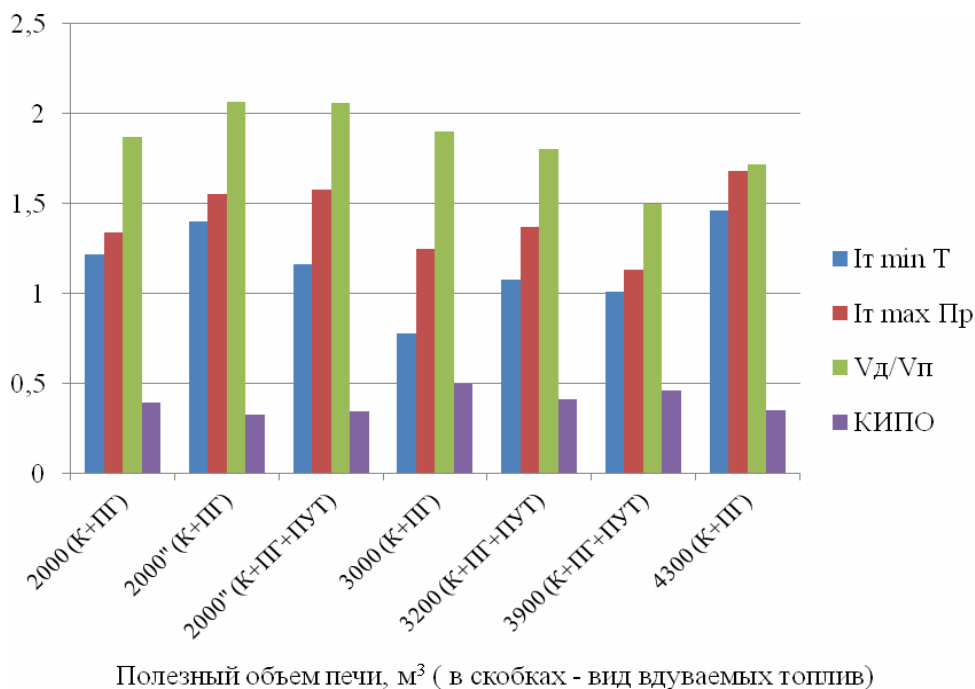


Рисунок 2 Гистограмма сравнения показателей интенсивности плавки

Исследования зависимостей  $Pr$  и  $K$  от интенсивности плавки по топливу ( $I_m$ ) не выявили их экстремального характера, отмеченного в работах [1, 2, 4]. При этом в большинстве случаев статистически установлена достаточно надежная линейная зависимость. В таблице 2 приведены значения коэффициентов корреляции между исследуемыми показателями.

Отсутствие экстремумов можно объяснить характером ведения плавки в современных условиях и статистическим (выборочным) методом исследования.

Наличие минимума по расходу кокса объяснялось в предыдущих исследованиях тем, что «...существует вполне определенная область интенсивности хода, при которой расход кокса минимален или близок к минимальному, т. е. имеет место рациональное газораспределение, обеспечивающее максимальное использование газов при ровном ходе шихты. Уменьшение интенсивности ниже оптимальной ведет к неравномерному газораспределению (периферийный ход газов); увеличение — опять-таки к неравномерному газораспределению, связанному с повышением выноса мелких фракций. В обоих случаях неизбежен повышенный расход кокса» [1]. В настоящее время возможности контроля и управления газораспределением позволяют вести плавку с достаточно высокой интенсивностью, ориентируясь на устойчивый «ровный ход» печи.

Таблица 2  
Коэффициенты корреляции между исследуемыми показателями

Номер печи в табл. 1	Топливо	Коэффициент корреляции (r) между показателями		
		$I_m - Pr$	$I_m - T$	$T - Pr$
1	К+ПГ	+0,32	+0,75	-0,38
2	К+ПГ	+0,47	+0,63	-0,39
2	К+ПГ+ПУТ	+0,52	+0,64	-0,32
3	К+ПГ	+0,92	+0,49	+0,13
4	К+ПГ+ПУТ	+0,71	+0,35	-0,19
5	К+ПГ+ПУТ	+0,86	+0,62	-0,26
6	К+ПГ	+0,83	+0,42	-0,30

Отсутствие максимума по производительности объясняется ведением плавки без «передувов», т. е. без стремления одномоментно получить высокую производительность. Об этом свидетельствуют небольшие отрицательные коэффициенты корреляции между расходом топлива и производительностью. Повышение интенсивности плавки сопровождается увеличением удельного расхода топлива, но одновременно и в большей степени возрастает производительность. Кроме того, следует учитывать, что изменение ряда параметров (содержание железа в железорудной части шихты и др.) оказывает на производительность печи и расход кокса противоположное влияние.

Для уточнения выводов по рассматриваемому вопросу необходимы дальнейшие исследования.

Выводы:

1. Результаты проведенных исследований по наличию связи между показателями интенсивности плавки и объемом доменных печей неоднозначны.

Поэтому в дальнейшем планируется исследовать технологию выплавки чугуна на доменной печи 6 объемом 4300 м<sup>3</sup> с целью выявления причин, позволивших получить столь высокие технико-экономические показатели.

2. Исследования зависимостей суточной производительности печи и удельного расхода от интенсивности плавки по топливу ( $I_m$ ) не выявили их экстремального характера, отмеченного в ряде исследований. Однако статистически установлена достаточно надежная линейная зависимость между рассматриваемыми показателями доменной плавки.

В дальнейших исследованиях следует уточнить положение экстремумов для зависимости суточной производительности печи и удельного расхода кокса от интенсивности плавки по топливу ( $I_m$ ).

## Библиографический список

1. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
2. Товаровский, И. Г. Доменная плавка [Текст] / И. Г. Товаровский. — [2-е изд.]. — Днепропетровск : Пороги, 2009. — 768 с.
3. Металлургия чугуна [Текст] / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др.; под ред. Ю. С. Юсфина. — [3-е изд.]. — М. : Академкнига, 2004. — 774 с.
4. Ефименко, Г. Г. Металлургия чугуна [Текст] / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — М. : Вища школа, 1981. — 496 с.
5. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом [Текст] / И. Г. Товаровский и др. — М. : Металлургия, 1978. — 264 с.
6. Мельниченко, А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении [Текст] : учеб. пособ. / А. С. Мельниченко. — М. : Изд. дом МИСус, 2009. — 268 с.
7. Коробов, В. И. Статистические исследования доменного процесса [Текст] / В. И. Коробов. — М. : Металлургия, 1977. — 184 с.

© Диментьев А. О.© Должиков В. В.© Михайлюк Г. Д.© Карпов А. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,  
к.т.н., доц. каф. металлургических технологий ЛГТУ Шипельниковым А. А.**

Статья поступила в редакцию 01.12.2021.

**PhD in Engineering Dimentiev A. O., PhD in Engineering Dolzhikov V. V., Mikhailuk G. D.**  
(DonSTI, Alchevsk, LPR), **PhD in Engineering Karpov A. V.** (LSTU, Lipetsk, the Russian Federation)  
**STUDIES OF LINKS BETWEEN THE MAIN MELTING INDICATORS AND THE DRIVING  
RATE INTENSITY OF THE BLAST FURNACES OF DIFFERENT VOLUMES**

*The paper presents the results of statistical study of links between the main performance indicators of the blast furnaces of different volumes (furnace performance and specific fuel consumption) with the melting intensity. It is determined that the dependencies between them do not have an extreme character, noted in a number of studies, but at the same time they are quite reliably connected linearly.*

**Key words:** blast furnace, furnace performance, specific fuel consumption, melting intensity, links of blast furnace melting indicators.